DOI: 10.3901/JME.2019.10.133

有轨电车曲线啸叫噪声试验分析*

赵悦^{1,2} 何远鹏^{1,2} 韩健¹ 肖新标¹ 连逢逾³ 王蕊³

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

2. 成都新筑路桥机械股份有限公司 成都 611430;

3. 成都轨道交通集团有限公司 成都 610041)

摘要: 曲线啸叫噪声是城市轨道交通中一个亟待解决的问题,但目前国内对其研究较少。以70%低地板有轨电车通过嵌入式轨道小半径曲线时为研究对象,通过测试和分析,研究其轮轨啸叫噪声特性及产生机理。测试曲线半径分别是25 m和50 m,试验速度分别是3~9 km/h和4~20 km/h。试验过程中轮轨接触表面状态分别考虑了自然状态、水润滑状态、油润滑状态和固体润滑状态。测试结果表明,未润滑状态下的车外标准点噪声 L_{Aeq} 在56~91 dB(A),其中87%~92%的工况发生啸叫或轻微啸叫;导向轮对(第一位轮对)内侧车轮发出的啸叫噪声最为显著,其产生机理是轮轨间的横向蠕滑激励车轮1 811 Hz频率处(0,3)轴向模态振动,从而产生强烈的单频振动并发出啸叫。试验对比了不同润滑状态(水、润滑油、固体润滑剂)对啸叫的控制效果,测试结果表明采取润滑后,测试工况中发生啸叫或轻微啸叫的比例降低到19%~50%,车外噪声 L_{Aeq} 显著降低。研究补充了国内在有轨电车-嵌入式轨道曲线啸叫方面试验数据,并基于试验数据基本弄清了有轨电车-嵌入式轨道曲线啸叫噪声的产生机理。

关键词: 啸叫; 曲线; 有轨电车; 嵌入式轨道; 润滑

中图分类号: U270

Measurements and Analyses of Curve Squeal Caused by Tram

ZHAO Yue^{1,2} HE Yuanpeng^{1,2} HAN Jian¹ XIAO Xinbiao¹ LIAN Fengyu³ WANG Rui³

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. Chengdu Xinzhu Road & Bridge Machinery Co. Ltd., Chengdu 611430;

3. Chengdu Rail Transit Group Co., Ltd., Chengdu 610041)

Abstract: Curve squeal noise is an urgent problem to be solved in urban rail transit, however there is less research on it in China at present. Taking the 70% low-floor tram traversing the tight curves of embedded rail track as the research object, the characteristics and mechanisms of wheel/rail squeal are investigated by measurements and analyses. The radiuses of the measured curves are 25 m and 50 m, the velocities of the tram traversing the measured curves are 3~9 km/h and 4~20 km/h respectively. During the field test, the state of the wheel/rail contact surface is considered natural state, water lubrication, oil lubrication and solid lubrication respectively. Measured results show that the exterior noise L_{Aeq} is in the range of 56 to 91 dB(A), in which 87%~92% of the measurements occur curve squeal when not adopting lubrication; the squeal emitted by the inner wheel of the leading wheelset(the first wheelset) is the most significant, the mechanism is that the lateral creep between the wheel and rail excites the (0,3) axial wheel mode at 1 811 Hz so that the wheel vibrates significantly at the single frequency and squeals. The effects of different lubrication conditions (water, oil lubricant, solid lubricant) on controlling the squeal are also investigated. It is found that the percentage of the measurements occurring curve squeal or slight curve squeal reduces to 19% to 50 %, and the exterior noise L_{Aeq} reduces significantly when adopting lubrication. The domestic measured data on the tram-embedded rail track curve squeal are supplemented with the research, and based on the measured data, the mechanism of squeal noise emitted by the tram is basically understood.

Key words: squeal; curve; tram; embedded rail track; lubrication

* 国家科技支撑计划(2015BAG13B01-03, 2015BAG12B01-16)和四川省科技支撑计划(2016GZ0332, 2017GZ0245)资助项目。20180708 收到初稿, 20190302 收到修改稿

0 前言

曲线啸叫是列车通过小半径曲线时产生的一种强烈的、高音调的噪声,通常比滚动噪声大 10~30 dB^[1-2]。曲线啸叫是最喧闹、最扰民的一种噪声源,在铁路、地铁和有轨电车的曲线线路中都可能存在。国际铁路联盟(UIC)的一项研究表明,在欧洲受到滚动噪声影响的居民有 12%同时也受到曲线啸叫的影响,受扰人数约为 150 万,且 7%的乘客受到曲线啸叫的影响^[2],曲线啸叫已经成为严重的环境噪声干扰。尤其在有轨电车线路中,小半径(25~100 m)曲线较多,且线路通常穿越人口密集区域,尤其在十字街口,其对周围沿线居民的影响将更为严重。

曲线啸叫产生的原因是列车车轮自激振动的结果。轮轨摩擦因数通常被认为随着滑动速度的增加而下降,这种轮轨间静态摩擦和动态摩擦的差异是激励车轮产生自激振动的原因之一。RUDD^[3]描述了三种可能的激励机理,并认为轮轨接触区的不稳定横向蠕滑是引起啸叫的最可能原因。

为了解曲线啸叫噪声的特性,很多学者进行了不同工况下的现场试验和分析^[1,4-7],试验结果表明,曲线啸叫在 450~8 000 Hz 之间很宽的频率范围都有出现。市郊轨道列车小半径曲线啸叫试验结果表明^[1,4-5],列车导向轮对(第一位轮对)内轮发出的啸叫声最显著,且与车轮 0 节圆轴向模态密切相关。有轨电车小半径曲线啸叫试验结果表明^[5-7],装备弹性车轮并不能消除啸叫噪声。VINCENT 等^[5-6]测得的啸叫噪声分别在内侧车轮、导向轮对内侧车轮最显著,也均与车轮 0 节圆轴向模态密切相关;而 CORRADI 等^[7]测得的啸叫噪声在内侧车轮、外侧车轮均显著,车轮轴向模态、径向模态均对其有贡献。

润滑和摩擦改进剂是缓解啸叫的有效措施,其旨在改变摩擦因数随着滑动速度的增加而下降的特性,使摩擦因数随着滑动速度的增加保持不变或有所增大^[8],缩小静态摩擦和动态摩擦的差异,以抑制轮轨接触区不稳定的横向蠕滑激励车轮产生自激振动从而辐射啸叫噪声。现场试验结果分析表明^[9-11],摩擦改进剂应用于钢轨顶部可有效降低啸叫噪声。此外,水也可以用于减轻啸叫噪声,CORRADI 等^[7]在有轨电车小半径曲线轨道上喷水并进行测试,发现曲线啸叫完全消失。

本文以 70%低地板有轨电车通过嵌入式轨道小半径曲线时为研究对象,测试并分析其曲线通过时

的啸叫噪声产生机理及噪声特性,并对比分析不同润滑状态(水、润滑油、固体润滑剂)下的曲线通过时噪声特性,明确其降噪效果,为曲线啸叫噪声的控制措施提供参考。

1 判定标准及控制标准

1.1 啸叫判定标准

MOEHLER 等^[12]中给出了啸叫噪声的判定标准,是否产生啸叫是由列车曲线通过时车外噪声标准点(距轨道中心线 7.5 m 远,距轨面高 1.2 m)测得的最大声级 L_{Amax} 与等效声级 L_{Aeq} 之间的差异 ΔL 来判定的, ΔL 计算式如下

$$\Delta L = L_{Amax} - L_{Aeq} \quad (1)$$

若 $\Delta L > 8 \text{ dB}$,则判定发生啸叫;若 $8 \text{ dB} > \Delta L > 5 \text{ dB}$,则判定发生轻微啸叫;若 $\Delta L < 5 \text{ dB}$,则判定未发生啸叫。

1.2 噪声控制标准

目前各类环境噪声控制标准均以等效声级 L_{Aeq} 限值来控制各类声环境功能区区的噪声情况。参考《声环境质量标准》^[13]、《铁路边界噪声限值及其测量方法》^[14]及《新干线铁路噪声环境质量标准》^[15],将有轨电车沿线声环境区域考虑为铁路边界或城市轨道交通(地面段)区域,表 1 给出了各标准对应的噪声限值。

表 1 噪声等效声级限值

标准名称	测点位置	噪声限值/dB(A)	
		昼间	夜间
声环境质量标准	一般户外,高于地面 1.2 m	70	55
	噪声敏感建筑物户外,高于地面 1.2 m;噪声敏感建筑物室内		
铁路边界噪声限值及其测量方法	铁路边界,高于地面 1.2 m	70	60
新干线铁路噪声环境质量标准	户外,高于地面 1.2 m	6:00-24:00	
		70	

2 曲线啸叫噪声试验

试验车辆为 3 节编组有轨电车,其中 1 车、3 车为动车(装配刚性轮对转向架),2 车为拖车(装配独立轮对转向架),车轮均为弹性车轮。试验线路为嵌入式轨道小半径曲线线路,线路平面图如图 1 所示,有两条小半径曲线,半径分别为 25 m、50 m,过曲线速度工况为 3~20 km/h。

2.1 噪声试验

分别在各车轮外侧布置麦克风,测试列车曲线通过时的轮旁噪声,测点照片如图 2 所示。

图1 线路断面图及车外噪声测点示意图

图2 轮旁噪声测点照片

在试验线路的两条小半径曲线段中分别选择一个断面, 分别在曲线断面的内侧、外侧, 距离轨道中心线 7.5 m 远、距轨面高 1.2 m 处布置麦克风, 测试有轨电车通过曲线时的车外噪声, 测点位置示意图如图 1、3 所示。

图3 测试断面处车外噪声测点示意图

2.2 振动试验

多数研究^[4-7]认为曲线啸叫与车轮振动模式密切相关, 测试列车曲线通过时车轮的振动响应能直接对比分析啸叫噪声与车轮振动之间的相关性。但由于测试设备的限制, 只能间接测试轴箱振动响应来进行对比分析。在有轨电车转向架各轴箱位置分别布置加速度传感器测试其振动响应。

此外, 在图 1 所示的两处曲线断面, 分别在曲

线外侧、内侧钢轨轨头布置加速度传感器, 测试有轨电车通过曲线时钢轨轨头的振动响应, 测点布置照片如图 4 所示。

图4 曲线断面钢轨轨头振动测点

2.3 工况设置

为分析啸叫噪声特性及润滑措施对啸叫噪声的控制效果, 测试的工况如表 2 所示。

表2 测试工况表

曲线半径/m	润滑状态	运行速度/(km/h)
25	未润滑	3~9
	内外轨润滑(水)	6~9
	内轨润滑(润滑油)	3~9
	外轨润滑(润滑油)	3~9
	内外轨润滑(润滑油)	3~9
50	未润滑	4~20
	内外轨润滑(水)	10~19
	内外轨润滑(固体润滑)	11~20

3 啸叫噪声特性及机理分析

3.1 啸叫噪声特性分析

根据表 2 设置的工况, 轨面未润滑状态下分别在的 $R=25$ m、 $R=50$ m 小半径曲线进行多组啸叫噪声测试, 由于现场试验条件的限制, 各运行速度下试验重复工况次数不等。在各组试验工况下, 曲线内侧、外侧的车外噪声测点测试得到的等效声级 L_{Aeq} 分布情况如图 5 所示, 其中实心图

标表示曲线内侧车外噪声测试数据,空心图标表示曲线外侧车外噪声测试数据;并根据第1.1节中的啸叫判定标准,对图5所示数据进行啸叫判定及分类。

图5 车外噪声 L_{Aeq} 测试值分布(轨面未润滑)

由图5a可知,有轨电车通过 $R=25\text{ m}$ 的小半径曲线时,列车运行速度在 $3\sim 9\text{ km/h}$,所测数据中12.5%未发生啸叫,46.9%发生轻微啸叫,40.6%发生啸叫;所测数据基本随速度增大而增大,车外噪声 L_{Aeq} 在 $68\sim 91\text{ dB(A)}$,内侧车外噪声 L_{Aeq} 显著大于外侧噪声,内侧发生啸叫或轻微啸叫的比例较外侧大;所测数据基本均超过昼间噪声标准限值 70 dB(A) ,仅列车运行速度为 3 km/h 时的个别数据能达到标准限值的要求。类似地,有轨电车通过 $R=50\text{ m}$ 的小半径曲线时的啸叫噪声也具有相同的特征,如图5b所示,列车运行速度在 $4\sim 20\text{ km/h}$,所测数据中7.3%未发生啸叫,34.5%发生轻微啸叫,58.2%发生啸叫;车外噪声 L_{Aeq} 在 $56\sim 91\text{ dB(A)}$;所测数据基本均超过噪声标准限值 70 dB(A) ,仅列车运行速度为 $4\sim 6\text{ km/h}$ 时的少量数据能达到标准限值的要求。图5中部分未发生啸叫的车外噪声测试值超

过了噪声限值 70 dB(A) ,该现象基本出现在曲线外侧车外噪声测点,结合图6所示的曲线内侧、外侧测点的车外噪声时域特性($v=15\text{ km/h}$, $R=50\text{ m}$)可以较好地解释其原因。有轨电车通过曲线时,曲线内侧车外噪声存在明显噪声峰值,而曲线外侧车外噪声没有,根据第1.1节所述啸叫噪声判定标准,则可能判定曲线外侧未发生啸叫噪声,但曲线外侧车外噪声值可能在一定程度受到曲线内侧车外噪声的影响,其噪声水平仍然较大。

$R=25\text{ m}$ 、 $R=50\text{ m}$ 的小半径曲线和不同运行速度工况下试验数据中,啸叫的时域特性、频域特性基本保持一致,而幅值随曲线半径、速度的不同有一定差异。因此,以有轨电车运行速度为 15 km/h 、 $R=50\text{ m}$ 小半径曲线测得的车外噪声数据为例进行分析,通过曲线时内侧、外侧车外噪声声压时间历程曲线如图6所示,噪声频谱云图如图7所示。

图6 车外噪声时间历程曲线($R=50\text{ m}$, $v=15\text{ km/h}$)

由图6可知,有轨电车通过曲线的整个时段内,曲线内侧车外噪声较外侧大;有轨电车进入曲线时车头引起啸叫噪声最显著,3车其次,2车通过曲线时引起的啸叫噪声相对较小,其主要原因是该有轨电车1车、3车装备刚性轮对,2车装备独立轮对,刚性轮对曲线通过能力相对较差,其引起啸叫的可能性更大,且头车第一轮对为导向轮对,轮轨冲角较大,轮轨间的横向蠕滑更显著,其激励车轮振动并发出啸叫。

由图7可知,有轨电车通过曲线的整个时段内,内侧、外侧车外噪声频谱均在 1.828 kHz 频率处出现非常显著的亮带,这是啸叫来源的主要频率,其次,在 744 Hz 、 3.656 kHz 频率处也存在啸叫,但幅值相对较小,持续性相对较弱; 744 Hz 、 1.828 kHz 、 3.656 kHz 频率处内侧的啸叫较外侧更显著。

图 7 车外噪声频谱云图($R=50\text{ m}$, $v=15\text{ km/h}$)

3.2 啸叫产生机理分析

由上节分析可知, 有轨电车进入小半径曲线时引起啸叫噪声显著, 因此, 以有轨电车 1 车转向架的轮旁噪声、轴箱振动以及曲线钢轨振动数据($R=50\text{ m}$, $v=15\text{ km/h}$)为例进行啸叫产生机理分析。在曲线通过时间段内, 1 车各车轮轮旁噪声总声压级、1 车第 1 轮对轮旁噪声频谱、曲线钢轨振动频谱和 1 车第 1 轮对轴箱振动频谱分别如图 8~11 所示。

图 8 1 车各车轮轮旁噪声总声压级
($R=50\text{ m}$, $v=15\text{ km/h}$) 图 9 1 车 1 轮对轮旁噪声频谱($R=50\text{ m}$, $v=15\text{ km/h}$) 图 10 曲线钢轨轨头振动加速度频谱($R=50\text{ m}$, $v=15\text{ km/h}$)

图11 1车1轮对轴箱振动加速度频谱($R=50\text{ m}$, $v=15\text{ km/h}$)

由图8~11可知,1车第1轮对轮旁噪声较第2轮对大,其中1车第1轮对内侧车轮总声压级最大;1车第1轮对内侧、外侧轮旁噪声均在1.828 kHz、3.656 kHz、5.484 kHz存在显著的啸叫噪声峰值,1.828 kHz处的噪声是啸叫噪声的主要来源,且内侧轮旁噪声峰值更显著;曲线内轨振动较外轨显著,且内轨横向、垂向振动均在啸叫噪声显著频率1.828 kHz、3.656 kHz、5.484 kHz处存在显著的振动峰值,而外轨在啸叫噪声显著频率处并不存在显著的振动峰值;1车第1轮对轴箱横向振动较垂向大,内侧、外侧轴箱均在1.828 kHz存在显著振动峰值,在3.656 kHz存在局部振动峰值,且内侧轴箱振动峰值较外侧轴箱大,由于未直接测试曲线通过是车轮处的振动,由图11所示轴向振动频谱推断内侧、外侧车轮可能均在1.828 kHz存在显著振动峰值,在3.656 kHz存在局部振动峰值,且内侧车轮振动峰值较外侧车轮大。

由于该测试轨道结构为嵌入式轨道,钢轨嵌入地面中,钢轨振动辐射噪声面积很小,啸叫噪声的主要来源应是车轮。根据有轨电车车轮参数,建立的弹性车轮有限元仿真模型,其模态分析结果显示弹性车轮在1.811 kHz处存在(0,3)轴向振动模态,如图12所示,该模态弹性车轮轮辋轴向振动显著,

图12 1.811 Hz弹性车轮(0,3)轴向振动模态

该模态振动频率与上述啸叫噪声显著频率、内轨振动峰值频率、内侧轴箱振动峰值频率及可能存在的车轮振动峰值频率接近,弹性车轮(0,3)轴向模态可能是1.828 kHz处啸叫的主要来源。

综合分析图8~12,推断啸叫产生的机理如下:有轨电车通过小半径曲线时,主导轮对冲角大,其因运动惯性试图向前呈直线滚动,但外侧车轮被轮缘限制,外侧车轮轮缘根部与钢轨内侧面贴靠并沿着曲线滚动,而内侧车轮踏面与钢轨顶面接触并在整个曲线通过、转向过程中不断发生车轮踏面与钢轨间的往复横向滑动。因此,内轮轮轨间横向蠕滑较外轮显著,是激励内轮产生自激振动的主要原因,其中1.811 kHz处车轮(0,3)轴向振动模态被激发,产生强烈振动并发出啸叫。

4 润滑的降噪效果

控制啸叫最有效的途径是润滑,试验对比了曲线钢轨分别采用水、润滑油或固体润滑剂进行润滑后啸叫的控制效果。

如图13所示,直接采用喷壶将水喷在整个曲线钢轨表面,水膜附着在整个钢轨顶面和侧面,但钢轨表面的水易蒸发,水润滑的各测试工况下曲线钢轨表面水膜的厚度略有差异。图14为水润滑各试验工况下有轨电车通过 $R=25\text{ m}$ 、 $R=50\text{ m}$ 小半径曲线时的车外噪声 L_{Aeq} 测试值分布。

图13 曲线钢轨水润滑现场照片

由图14可知,水润滑后啸叫发生的概率显著降

低,通过 $R=25\text{ m}$ 的小半径曲线时,所测数据中 50% 未发生啸叫, 38.9% 发生轻微啸叫, 11.1% 发生啸叫, 通过 $R=50\text{ m}$ 的小半径曲线时, 所测数据中约 80% 未发生啸叫, 15% 发生轻微啸叫, 5% 发生啸叫; 水润滑后车外噪声 L_{Aeq} 较润滑前显著降低, 约 85% 的车外噪声 L_{Aeq} 数据可以达到标准限值的要求。此外, 图 14 中个别试验工况下车外噪声 L_{Aeq} 较大, 并且发生啸叫或轻微啸叫, 其原因是个别测试工况下钢轨表面的水部分蒸发, 钢轨表面附着的水膜相对较薄或消失, 因对轮轨接触区的润滑不够。因此, 若采取水润滑措施, 水量的大小对啸叫噪声的控制效果有显著影响。

图 14 水润滑后车外噪声 L_{Aeq} 测试值分布

为进一步了解水润滑对啸叫噪声的控制效果, 曲线半径 $R=50\text{ m}$ 、列车运行速度为 15 km/h 时, 干燥状态、水润滑状态下 1 车 1 轮对轮旁噪声频谱对比如图 15 所示。

由图 15 可知, 水润滑后, 在 1 kHz 以上频率范围, 1 车 1 轮对轮旁噪声显著降低, 且在干燥状态下的啸叫噪声显著频率处未出现显著噪声峰值, 即水润滑可以有效地抑 1.828 kHz 、 3.656 kHz 、 5.484 kHz

图 15 水润滑对轮旁噪声频谱的影响($R=50\text{ m}$, $v=15\text{ km/h}$)

kHz 频率处啸叫的发生。但是, 水润滑后 1 车 1 轮对轮旁噪声在 4 kHz 处出现局部噪声峰值, 其可能是轻微的啸叫, 但其噪声峰值较干燥状态时的啸叫噪声峰值显著降低, 因此未在噪声总值中体现出来。

如图 16 所示, 采用人工涂抹的方式在曲线钢轨轨距角及部分钢轨顶面处涂抹润滑油, 涂抹时基本覆盖轮轨接触光带区域。试验时分别对比了内轨润滑、外轨润滑、内外轨同时润滑对啸叫噪声的控制效果, 其中内轨润滑、外轨润滑时, 润滑一侧的车外噪声 L_{Aeq} 较润滑前显著降低, 但未润滑一侧的车外噪声 L_{Aeq} 变化不大。图 17 为内外轨同时进行润滑油润滑时, 有轨电车通过 $R=25\text{ m}$ 小半径曲线时的车外噪声 L_{Aeq} 测试值分布。

图 16 曲线钢轨润滑油润滑现场照片

由图 17 可知, 内外轨同时润滑后啸叫发生的概率显著降低, 润滑油润滑位置覆盖轮轨接触位置时基本可以消除啸叫噪声的发生, 若润滑油润滑位置未能完全覆盖轮轨接触位置也会发生一定的啸叫(如图 17 中低速工况); 润滑后车外噪声 L_{Aeq} 较润滑前显著降低, 试验数据均可以达到标准限值的要求。

图 17 油润滑后车外噪声 L_{Aeq} 测试值分布($R=25\text{ m}$)

类似地, 采用人工涂抹的方式在曲线内外侧钢轨距角及部分钢轨顶面处涂抹固体润滑剂, 涂抹时基本覆盖轮轨接触光带区域, 如图 18 所示。图 19 为内外轨同时进行固体润滑剂润滑时, 有轨电车通过 $R=50\text{ m}$ 小半径曲线时的车外噪声 L_{Aeq} 测试值分布。

图 18 曲线钢轨固体润滑剂润滑现场照片

图 19 固体润滑后车外噪声 L_{Aeq} 测试值分布($R=50\text{ m}$)

由图 19 可知, 内外轨同时润滑后啸叫发生的概率显著降低, 其中, 在 $v<15\text{ km/h}$ 情况下, 基本未发生啸叫, 且车外噪声 L_{Aeq} 可以达到噪声标准限值; 而在 $v>15\text{ km/h}$ 时, 仍发生一定啸叫, 且车外噪声 L_{Aeq} 基本超出噪声标准限值。固体润滑剂润滑后, 车辆运行速度较大的工况仍发生一定啸叫, 其原因是在车速较高的情况下, 轮轨接触位置发生一定改变, 润滑剂未能覆盖轮轨接触位置; 速度较大时, 轮轨间相互作用力更大, 车轮挤压钢轨表面以至固体润滑膜未能形成, 从而轮轨刚性接触仍然较强。润滑油润滑、固体润滑对啸叫噪声频谱的影响与水润滑对啸叫噪声频谱的影响类似, 这里不再赘述。

水、润滑油、固体润滑剂均通过降低轮轨间摩擦因数、缩小轮轨静态摩擦和动态摩擦的差异来控制啸叫。综合对比各润滑介质特点及啸叫控制效果可知, 水润滑无污染、成本低且不影响轮轨粘着, 啸叫噪声控制效果好, 但气温较高时水蒸发快, 会显著影响啸叫控制效果, 而气温较低时水可能结冰, 影响轮轨粘着, 建议在南方冬季温度相对较高区域可以采用水作为轨道润滑物质, 配合轨道上安装的自动喷水装置, 车辆通过曲线时自动喷水润滑降低啸叫噪声; 润滑油、固体润滑剂的涂抹位置对啸叫噪声的控制效果影响显著, 其涂抹量及涂抹位置需根据啸叫控制效果、保持轮轨粘着特性综合考虑, 润滑油、固体润滑剂受气温的影响较小, 但可能存在一定污染, 建议在北方冬季温度相对较低区域可以采用润滑油、固体润滑剂作为轨道润滑物质, 但润滑油、固体润滑剂喷涂装置需要较为精准地控制润滑物质喷涂量及喷涂位置。有轨电车小半径曲线线路润滑措施的选择需根据线路特点、沿线区域环境、气候特点、噪声控制要求等进行综合考虑。

5 结论

(1) 通过有轨电车曲线啸叫噪声现场试验, 掌握了其啸叫噪声的分布情况及特点。轨面未润滑时, 87%~92%的试验工况均发生啸叫或轻微啸叫, 大多数试验数据超出噪声标准限值 70 dB(A), 对沿线环境影响显著;

(2) 有轨电车曲线通过时啸叫噪声的时域特性表明独立轮对可能在一定程度上有利于曲线通过、降低啸叫。有轨电车曲线通过时啸叫噪声的频域特性表明 1.828 kHz 处的啸叫是该有轨电车通过小半径曲线时啸叫的主要来源;

(3) 综合分析有轨电车曲线啸叫噪声特性及有轨电车、嵌入式轨道的振动特性, 推断了啸叫噪声

的产生机理:曲线内侧轮轨间的横向蠕滑激励车轮1.811 kHz 频率处(0,3)轴向振动模态,从而车轮产生强烈的单频振动并发出啸叫。

(4) 试验分析了润滑措施对啸叫噪声的控制效果。水、润滑油、固体润滑剂均可以显著控制啸叫噪声,采取润滑后,试验工况中未发生啸叫的比例可以提高到50%~81%;且大多数车外噪声 L_{Aeq} 测试数据可以达到噪声标准限值70 dB(A)。

(5) 有轨电车小半径曲线线路的润滑措施的选择需根据线路特点、沿线区域环境、气候特点、噪声控制要求等进行综合考虑。

参 考 文 献

- [1] THOMPSON D. 铁路噪声与振动[M]. 北京:科学出版社, 2013.
THOMPSON D. Railway noise and vibration: Mechanisms, modelling and means of control[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [2] MULLER B, OERTLI J. Combating curve squeal: monitoring existing applications[J]. Journal of Sound & Vibration, 2006, 293(3-5): 728-734.
- [3] RUDD M J. Wheel/rail noise—Part II: Wheel squeal[J]. Journal of Sound & Vibration, 1976, 46(3): 381-394.
- [4] GLOCKER C, CATALDI-SPINOLA E, LEINE R I. Curve squealing of trains: Measurement, modelling and simulation[J]. Journal of Sound & Vibration, 2009, 324(1-2): 365-386.
- [5] VINCENT N, KOCH J R, CHOLLET H, et al. Curve squeal of urban rolling stock—Part 1: State of the art and field measurements[J]. Journal of Sound & Vibration, 2006, 293(3): 691-700.
- [6] RUITEN C J M V. Mechanism of squeal noise generated by trams[J]. Journal of Sound & Vibration, 1988, 120(2): 245-253.
- [7] CORRADI R, CROSIO P, MANZONI, et al. Experimental investigation on squeal noise in tramway sharp curves[C/CD]// Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, Eurodyn, 2011.
- [8] MATSUMOTO A, SATO Y, ONO H, et al. Creep force characteristics between rail and wheel on scaled model[J]. Foreign Rolling Stock, 2004, 253(1): 199-203.
- [9] EADIE D T, SANTORO M, KALOUSEK J. Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions in curves[J]. Wear, 2005, 258(7-8): 1148-1155.
- [10] EADIE D T, SANTORO M, POWELL W. Local control of noise and vibration with KELTRACK™ friction modifier and Protector®, trackside application: an integrated solution[J]. Journal of Sound & Vibration, 2003, 267(3): 761-772.
- [11] EADIE D T, SANTORO M. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction[J]. Journal of Sound & Vibration, 2004, 293(3): 747-757.
- [12] MOEHLER U, PRESTEL G, GIESLER H, et al. Schallemissionen von schienennahverkehrsbahnen[J]. Zeitschrift fuer Laermbekämpfung, 1998: 45.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 3096-2008 声环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 3096-2008 Environmental quality standard for noise[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [14] 中华人民共和国生态环境部. GB 12525-1990 铁路边界噪声限值及其测量方法(2008 年修改方案)[EB/OL], 2008. [2017-06-07]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/200910/t20091022_174500.htm.
Ministry of Ecology and Environment of People's Republic of China. GB 12525-1990 Limit value of railway boundary noise and its measuring method (2008 revised programme) [EB/OL], 2008. [2017-06-07]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/200910/t20091022_174500.htm.
- [15] Ministry of the Environment, Government of Japan. Environmental quality standards for shinkansen superexpress railway noise[EB/OL]. 1993. [2017-06-07]. <http://www.env.go.jp/en/air/noise/railway.html>.

作者简介: 赵悦, 女, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为铁路振动噪声。

E-mail: zhaoyue@my.swjtu.edu.cn

肖新标(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为铁路振动噪声。

E-mail: xinbiaoxiao@163.com